

円板回転型バイオリアクターにおける流れの可視化

Flow Visualization in Bioreactor with Rotating Disk

田子大輔 (埼玉大院) 平原裕行 (埼玉大)
川橋正昭 (埼玉大) Kerry Hourigan (モナシュ大学)

Daisuke Tago, Graduate school of Science and Engineering, Saitama University,
Sakura, Simo-okubo255, Saitama, 338-8570, Japan

Hiroyuki Hirahara, Saitama University

Masaaki Kawahashi, Saitama University

Kerry Hourigan, Monash University, Australia

A rotating disk type of bioreactor was inspected by PIV measurement. The fundamental flow structure and condition of vortex breakdown was explored for rotating disk velocity and aspect ratio, H/R of container. The velocity distribution when the rotating speed is 6 rpm was demonstrated for $H/R=1$ and 2. The results show the reasonable distribution of rotating flow. A spiral vortex structure and calm down and rising stream was observed in the structure.

Key Words: aggregate diameter, aspect ratio, bioreactor, Kolmogoroff eddy, Reynolds number

1. 緒論

バイオリアクターとは、人間が目的とする物質を得るために、動植物細胞・微生物などの生物の生体触媒を利用して、物質の合成や分解を行う手段または、それを行う反応器を指す。この技術の応用分野は多岐にわたり、食品、医療、環境などに及ぶ。バイオリアクターで培養する利点は、例えば反応器内の攪拌器の回転数を変えるなどにより流れが制御できることであり、同質かつ再現可能な培養ができるという点である。この特徴は重要であり、例えば単細胞を反応器に播種し培養した際分裂などにより細胞の集積体としてある程度まで集積径が大きくなると、細胞の中心まで栄養がいきわたらず壊死してしまう。そのため攪拌器の回転数を変えることで集積径を制御する。この際集積径と大きく関わっていると考えられている物理現象の一

つにコルモゴロフの渦がある。文献[1]ではコルモゴロフの渦スケールと細胞の集積径との関係が示されている (Fig.1)。我々の目的は流れの中にある微細渦を捉え、微細渦のスケールと強度を解析することで、微細渦が細胞の集積径を制御する仕組みを解明するところにある。そこで本研究では微細渦と細胞成長の関係を明らかにするための予備段階として PIV を用いて円盤回転型バイオリアクター内流れの全体構造を明らかにすることを目的とした実験を行った。

2. PIV 計測

2.1 実験装置

実験装置を Fig.2 に示す。リアクターは内径 100mm のアクリル円筒容器である。モータによって駆動される回転円板が底面に設置してあり、これが静かに回転することによってリアクター内に 3 次元の渦構造が形成され攪拌が促進される。PIV 計測のための光源には Nd:YAG レーザを

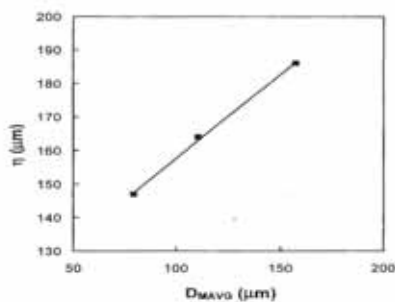


Fig.1. Effect of Kolmogoroff eddy scale(η) on the maximum mean aggregate diameter for NSC aggregates

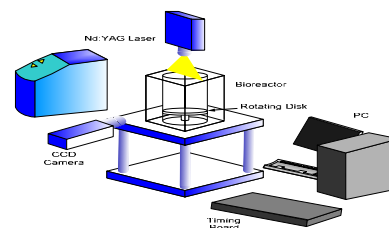


Fig.2 Schematic view of test apparatus and PIV measurement

用いている。レーザーの強度は 30mJ/pulse である。PIV 解析は ProVision(IDT 社)を用いており、リアルタイムでのデータ取得および解析統計処理が可能である。解析ソフトまた微小領域の撮影には接写リングを用いた。また作動流体には H/R=1 の時はヨウ化ナトリウムを使用し、H/R=2 の時は蒸留水を用いた。ヨウ化ナトリウムはアクリル容器の屈折率補正のために使用している。またトレーサ粒子は直径 20 μm のナイロンビーズを使用した。

2.2 実験方法

実験方法は水と粒子を混合させて反応器に投入し、レーザーとカメラを同期させて 500 枚程度撮影を行い、前後の画像を画像相関法で解析することにより速度分布を求める。

実験に必要なパラメータは円筒容器の半径に対する高さの比であるアスペクト比(H/R)と、レイノルズ数 $Re = \Omega R^2 / \nu$ であり、ここで Ω は回転盤の角速度、R は円筒容器の半径、 ν は動粘性係数である。

3. 実験結果および考察

以下に回転数 6rpm, $Re=1560$, アスペクト比がそれぞれ 1、2 の時の実験結果を示す。

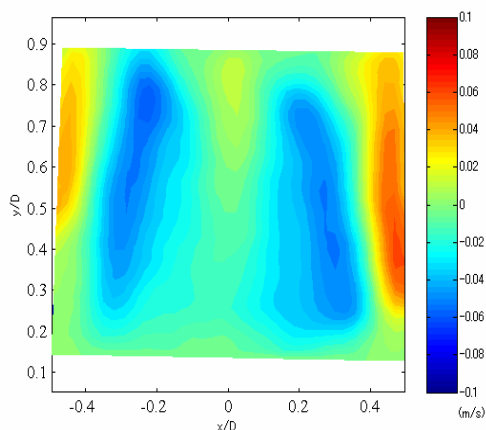


Fig 3. Vertical velocity distribution in axial direction when AH=2.0

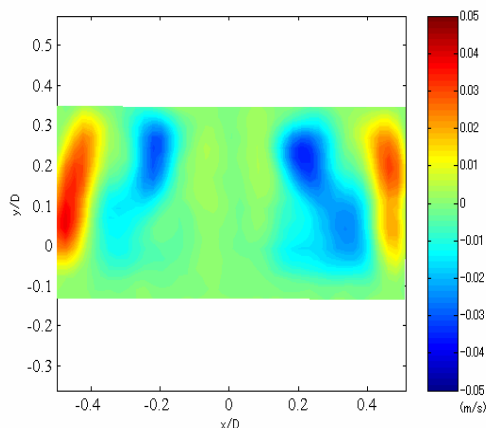


Fig4 . Vertical velocity distribution in axial direction when AH=1.0

上図は容器内における y 方向速度成分のみを示したもので、速度単位は m/s である。容器内の流れはアスペクト比とレイノルズ数に主として支配される。本バイオリアクターの中の流れは、基本的に底面円板において形成される境界層により、流体は回転成分を与えられ遠心力によって外周側にか加速される。これによって生じた流れが、容器外周部に上向き流れを生じ、回転容器中心軸付近では、下降流を形成する。結果的に容器内に 3 次元的な渦構造が形成される。渦はらせん状の流線を有する構造で、容器外周と中心軸の間にスパイラル渦構造が形成される。この渦のブレークダウンの条件決定も本研究での一連の実験目的の一つである。図 3 と図 4 において見られるように、 $x/D=0.2 \sim 0.3$ の領域に下降流が形成されている様子が観察できる。容器内の流れは予測される結果を表しているが、やや非対称性が現れている。これらは、時間平均流を表しているもので、本来、流れは時間平均的には対称であるべきであり、どのような理由によって非対称性が発生したかに関しては今後装置の精度、測定の精度を含めて検討しなければならない。

4. 結言

本研究では回転型バイオリアクター内の流れの構造をアスペクト比が 1.0, 2.0 それぞれの場合について明らかにした。また CCD カメラを用いて 12.5mm*10mm の領域を撮影した。アスペクト比が 1, 2 それぞれの場合において容器内の流れは左右対称であり円盤下部から上部へ向けて流れた後再び下降するという渦状の流れを確認された。

参考文献

- [1] A. Sen, M.S. Kallos, L.A. Behie, Expansion of mammalian neural stem cells in bioreactors: effect of power input and medium viscosity, Brain Research, Developmental Brain Research 134, 103-113, 2002
- [2] A. Sen, M.S. Kallos, L.A. Behie, Effects of Hydrodynamics on Cultures of Mammalian Neural Stem Cell Aggregates in Suspension Bioreactors, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 40, No.23, 2001
- [3] R. Budwing, Refractive index matching methods for liquid flow investigations, Experiments in Fluids 17(1994)350-355
- [4] G.J. Borse, Numerical Methods with MATLAB